

文章编号: 0253-2239(2007)09-1633-6

# 阿贝尔逆变换数据处理算法在电弧诊断中的应用

马税良 高洪明 张广军 吴 林

(哈尔滨工业大学 现代焊接生产技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 提出了一种由等离子体辐射投影值重建发射系数的阿贝尔逆变换数据处理算法。采用计算简单、变换精度高的 Bockasten 插值方法实现阿贝尔逆变换积分方程的离散化。在阿贝尔逆变换前, 运用傅里叶变换频域低通滤波去除实验数据中的噪声, 通过多项式插值弥补数据采样率过低、提高空间分辨力, 并对投影数据进行对称化处理以消除数据偏离对称对结果的影响。运用此算法对实验数据进行处理, 得到电流 200 A、弧长 5 mm 电弧温度在阴极下方 0.5 mm 处最高, 超过 22000 K, 与文献中结果一致。该算法能够有效地克服噪声对变换结果的影响, 运算速度快、计算精度高、稳定性好, 处理大量数据时具有明显的优势。

**关键词:** 等离子体物理; 阿贝尔逆变换; 数据处理; 电弧温度; 电弧等离子体诊断

中图分类号: O536 文献标识码: A

## A Data Processing Method for Abel Inversion in Arc Plasma Diagnostics

Ma Shuiliang Gao Hongming Zhang Guangjun Wu Lin

(State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

**Abstract:** A method is proposed for calculating the radially distributed emission coefficients of arc plasmas from the projections. The reconstruction is implemented by using a simple and accurate discrete Abel inversion method which is based on Bockasten's polynomial spline technique. The collected data are filtered in the frequency domain with a lowpass filter to reduce the noise, followed by interpolation for avoiding problems caused by undersampling and increasing data space resolution, and symmetrization for obtaining more accurate results. The arc temperature distribution deduced by the algorithm shows that for a 200 A, 5 mm argon arc, the highest temperature near the cathode is more than 22000 K, which agrees well with results of other researches. This algorithm effectively reduces the influence of noises, and it is very steady and fast, which makes advantages in the processing of large amounts of data.

**Key words:** plasma physics; Abel inversion; data process; arc temperature; arc plasma diagnostics

## 1 引 言

等离子体在材料加工<sup>[1]</sup>、材料制备、表面改性以及废气废物处理等工业领域具有广泛的应用。等离子体有关物理参量的径向分布, 是等离子体研究中的重要内容。而在等离子体的诊断中, 测量到的许多物理参量都是某一方向的投影值。对于柱对称的等离子体, 实验测得的辐射强度是等离子体的发射系数在一条直线上的积分值, 需要运用阿贝尔逆变

换得到等离子体的发射系数的径向分布, 进而计算等离子体内部的粒子密度、温度等其它物理量的分布。

阿贝尔逆变换应用于实验数据时, 一个突出的困难是数据中的噪声被放大, 而且实验误差在计算结果中由边缘向中心扩散和积累, 使得计算结果很不可靠。一个好的算法应该能够抑制或减小噪声的影响, 且具有较高的精度和稳定性。目前虽然很多

作者简介: 马税良(1981—), 男, 湖北人, 博士研究生, 主要从事焊接电弧的光谱诊断和传感等方面的研究。

E-mail: shlgma@yahoo.com.cn

导师简介: 吴 林(1935—), 男, 江苏人, 教授, 博士生导师, 主要从事焊接新工艺、焊接过程检测与控制、焊接机器人等方面的研究。E-mail: crwdai@hit.edu.cn

收稿日期: 2006-06-13; 收到修改稿日期: 2006-12-26

作者发展了大量算法<sup>[2~5]</sup>用于发射系数的重建,但是大多算法只注重阿贝尔逆变换的精度,忽略了变换前数据的处理,也很少考虑运算速度。

对此,本文提出了一种由实验测量值重建柱对称等离子体发射系数径向分布的数据处理算法。分析和总结了现有的各种阿贝尔逆变换算法的特点,确定以 Bockasten 三次多项式插值方法实现离散的阿贝尔逆变换,并给出了阿贝尔逆变换离散化算法的具体实现过程以及阿贝尔逆变换前投影数据的滤波、插值、对称化处理方法。采用该算法对实验测得的辐射强度值进行处理,得到了电弧的发射系数场,并由此计算出了正确的电弧温度分布。

## 2 发射系数的重建

### 2.1 阿贝尔变换及其逆变换

设  $I(y)$  是  $x$  轴向  $y$  处的辐射强度值,  $\epsilon(r)$  是径向  $r$  处的光谱发射系数。对于光学薄、柱对称的等离子体,探测器接收到的光强信号  $I(y)$  与等离子体发射系数  $\epsilon(r)$  的关系可由阿贝尔变换给出

$$I(y) = 2 \int_y^R \frac{\epsilon(r)rdr}{\sqrt{r^2 - y^2}}, \quad (1)$$

径向发射系数可由辐射强度值经阿贝尔逆变换得到

$$\epsilon(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^R \frac{dI/dy}{\sqrt{y^2 - r^2}} dy. \quad (2)$$

阿贝尔逆变换(2)式在积分下限存在奇点,并含有微分项。实验中得到的数据是离散值,而且数据

中不可避免地含有噪声,因而很难直接应用(2)式求解发射系数。对此,目前发展了多种阿贝尔逆变换算法。一些算法<sup>[2]</sup>假设发射系数或辐射强度具有某种分布,采用不同阶次的多项式对(1)式或(2)式进行离散化。另一些算法采用傅里叶变换的方法<sup>[3~5]</sup>求解发射系数,虽然在理论上避免了积分下限奇点带来的问题,但是应用于实验数据的处理时,对噪声非常敏感,稳定性差。因此,本文采用计算精度高、稳定性好的 Bockasten 三次多项式插值方法<sup>[2]</sup>求解发射系数。

### 2.2 阿贝尔逆变换的离散化

假设等离子体截面半径为  $R$ , 径向分布的发射系数  $\epsilon(r)$  对应于半径  $r_i = iR/N (i=0, 1, \dots, N-1)$  处的离散发射系数值为  $\epsilon_i$ 。辐射强度数据  $I_j$  为坐标轴  $y_j = jR/N (j=0, 1, \dots, N-1)$  上的投影值, 则  $\epsilon_i$  可通过如下公式求得

$$\epsilon_i = \frac{1}{R} \sum_{j=0}^{N-1} a_{ij} I_j, \quad (3)$$

式中  $a_{ij}$  为变换系数, Bockasten<sup>[2]</sup>采用  $I(y)$  的三次多项式插值求取  $a_{ij}$ 。其中  $P_{N-1}(y)$  为 2 次多项式, 由  $I_{N-2}, I_{N-1}$  和  $I_n (=0)$  确定。考虑到实验数据处理的方便性, 本文给出计算  $a_{ij}$  的另一种形式的表达式。设  $a_{ij} = -Np_{ij}/\pi$ , 又由于测量数据的间距为  $\Delta_E = R/N$ , 则(3)式可化为

$$\epsilon_i = -\frac{1}{\pi \Delta_E} \sum_{j=0}^{N-1} p_{ij} I_j, \quad (4)$$

系数  $p_{ij}$  可由下式求得

$$p_{ij} = \begin{cases} 0, & 2 \leq i \leq N-1, 0 \leq j \leq i-2 \\ u_0(i, j+1), & 1 \leq i \leq N-1, j = i-1 \\ u_0(i, j+1) + u_1(i, j), & 0 \leq i \leq N-1, j = i \\ u_0(i, j+1) + u_1(i, j) + u_2(i, j-1), & 0 \leq i \leq N-2, j = i+1 \\ u_0(i, j+1) + u_1(i, j) + u_2(i, j-1) + u_3(i, j-2), & 0 \leq i \leq N-3, i+2 \leq j \leq N-1 \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$u_l(i, j) = \sum_{k=0}^2 \theta_{lk}^i \omega_k(i, j), \quad l = 0, \dots, 3, 0 \leq i \leq j \leq N-1$$

并且  $u_l(i, N) = 0$ 。上式中  $\omega_k(i, j)$  为

$$\omega_k(i, j) = \int_j^{j+1} \frac{t^k dt}{\sqrt{t^2 - i^2}}, \quad k = 0, \dots, 2, 0 \leq i \leq j \leq N-1$$

$\theta_{lk}^i$  为  $\Theta_j$  的矩阵元,  $1 \leq j \leq N-2$  时

$$\Theta_j = \begin{bmatrix} -\frac{1}{6}(3j^2 + 6j + 2) & j + 1 & -\frac{1}{2} \\ \frac{1}{2}(3j^2 + 4j - 1) & -3j - 2 & \frac{3}{2} \\ -\frac{1}{2}(3j^2 + 2j - 2) & 3j + 1 & -\frac{3}{2} \\ \frac{1}{6}(3j^2 - 1) & -j & \frac{1}{2} \end{bmatrix},$$

$j=0$  和  $j=N-1$  时

$$\Theta_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -7/2 & 9/4 \\ 0 & 4 & -3 \\ 0 & -1/2 & 3/4 \end{bmatrix},$$

$$\Theta_{N-1} = \begin{bmatrix} -N + 1/2 & 1 & 0 \\ 2N - 2 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

实际应用中,需要确定绝对发射系数与计算得到的发射系数之间的关系。设投影值数据尾部补零后数据点数变为  $N$ ,用于计算发射系数的投影值  $I$  与测量值  $I_E$  的关系为  $I = I_E/\alpha$ ,其中  $\alpha$  为常数,由绝对强度标定确定。又设  $q_{ij} = -p_{ij}/\pi$ ,由(4)式可得绝对发射系数的计算公式

$$\varepsilon(r_i) = \frac{1}{\alpha\Delta_E} \sum_{j=0}^{N-1} q_{ij} I_E(y_j). \quad (6)$$

系数  $q_{ij}$  预先计算后保存,将各组测量值的尾部补零使其长度为  $N$ ,即可实现发射系数的快速计算。若只需计算发射系数的相对值,则可设  $\alpha\Delta_E = 1$ 。

### 3 阿贝尔逆变换数据的预处理

对于实验测得的投影值,在阿贝尔逆变换前需要进行相应的处理,以减小计算结果的误差。采用傅里叶变换滤波除去噪声,对数据插值提高采样率,并通过对称化方法消除数据的不对称性,即可得到适合于阿贝尔逆变换的数据。

#### 3.1 滤波和插值

对于阿贝尔逆变换中投影值的微分在实际应用中引发的困难,一种有效的解决方法是在变换前对数据滤波,尽量消除噪声的影响。根据最小平方误差准则对数据进行分段多项式拟合的方法,即 Savitzky-Golay 法<sup>[6]</sup>,在实际应用中窗口宽度的选择有一定的经验性,且窗口宽度与平滑效果密切相关。时域滤波方法中的 Fernández-Palop 法<sup>[7]</sup>,需要确定迭代次数和高斯函数的方差,而且卷积窗口的宽度也对滤波结果有很大影响。以上方法的缺点

是,滤波器的设计参量较多,实际使用困难。

傅里叶变换滤波是一种常用的频域滤波方法。根据光谱信号可由少数几个频率成分近似,将光谱信号进行傅里叶变换后去掉频域内的高频成分,从而有效除去高频噪声的影响。这种滤波方法只需确定截止频率,控制参量少,易于实现,且离散傅里叶变换有快速算法,运算速度快。

电弧等离子体具有体积小、光强分布梯度大的特点。一般实验系统的分辨力有限,等离子体截面上采集的数据较少,数据采样率低,导致阿贝尔逆变换精度低、误差大,甚至不能得到正确的发射系数分布。提高数据采样率有两种方式:增加实验系统的分辨力,对数据进行插值。前者成本高、难以实现,后者处理时需要较多的时间,但易于实现。为了保证插值后数据的连续性和光滑性,避免再次引入噪声,选用简单的三次多项式插值。

#### 3.2 对称化

实验得到的数据由于仪器及噪声等因素的影响可能是偏离中心和不完全对称的,为了提高等离子体中心计算结果的可信度,需要对实验数据进行对称化处理。对于等离子体本身的不对称造成的数据分布不对称,则应采用其他方法<sup>[8]</sup>求解发射系数。

由傅里叶变换的性质可知,对称信号的傅里叶变换仍为实的对称信号,而不对称信号的傅里叶变换存在虚部,时域中的中心偏离量与频域中一定的相移相联系。因而可以先确定相移,通过相移校正消除数据的中心偏离,再去掉傅里叶变换的虚部实现数据的对称化。假设噪声为平稳不相关的带限高斯随机过程,可得到确定时域中偏移量的方程<sup>[4]</sup>

$$\sum_{k=0}^{K-1} k \{ 2S_R(k)S_I(k) \cos(4\pi k\Delta n/N) - [S_R^2(k) - S_I^2(k)] \sin(4\pi k\Delta n/N) \} = 0, \quad (7)$$

其中  $K$  为噪声的谱成分数, $N$  为用于离散傅里叶变换的数据点数, $\Delta n$  为偏移量的估计值, $S_R$  和  $S_I$  分别为实验数据傅里叶变换后的实部和虚部。通过此方程运用迭代法即可求得偏移量的估计值  $\Delta n$ 。

求得偏移量的估计值后,在原始强度数据的傅

里叶变换即  $S(k)$  上乘以  $\exp(-2\pi k\Delta n/N)$ , 仍然存在的虚部认为是由噪声引起的, 直接去掉后进行傅里叶反变换即可得到光滑、对称的实值信号, 下一步便可以进行阿贝尔逆变换。

## 4 实 验

研究对象为大气压下自由燃烧 GTAW 定点直流电弧, 采用水冷铜作为阳极, 焊接电流 200 A, 钍钨极直径 2.4 mm, 钨极尖角  $60^\circ$ , 钨极尖端到工件的距离 5 mm。采用纯氩作为保护气, 流量 10 L/min。

通过凸镜将电弧成 1:2 放大的实像后, 由平移机构带动固定在其上的光纤探头移动对电弧进行扫描。电弧从阳极到阴极分为 11 层分别扫描, 各层实际间距 0.5 mm, 每层两点间实际间距 0.1 mm。光从光纤到达入射狭缝进入光谱仪, 最后通过 CCD 采集得到电弧的光谱分布数据。

采用原子谱线强度通过标准温度法计算电弧温度。由局域热力学平衡 (LTE) 假设计算出 ArI 696.5 nm 谱线的发射系数与温度的关系后, 对测量的辐射强度利用本文所述的阿贝尔逆变换方法求得发射系数, 便可计算出电弧空间不同位置的温度值。

## 5 结果与讨论

电弧几何尺寸较小, 当钨极与阳极距离为 5 mm 时, 最大半径一般不到 10 mm, 阴极处半径则更小, 而且电弧内部具有很大的梯度, 因而测量数据的信噪比常常较低。图 1 为电弧阴极下 0.5 mm 截面处的辐射强度分布, 该截面处的半径接近 3 mm。由图可知, 由于数据采样率过低, 电弧中心附近的辐射强度分布呈现波动性, 其实际分布形状难以确定, 这给电弧等离子体的诊断带来很大的困难。

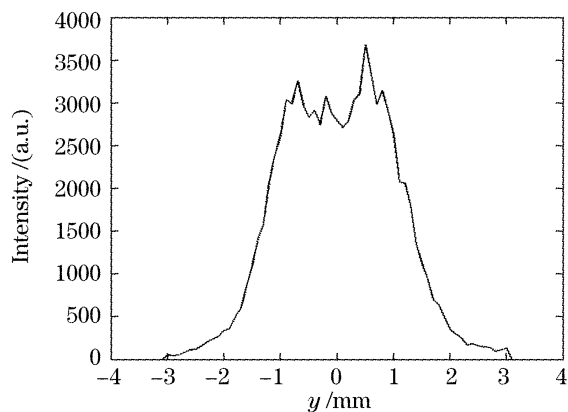


图 1 阴极下 0.5 mm 截面处辐射强度分布

Fig. 1 Intensity profile, 0.5 mm from cathode

对含有噪声的电弧辐射强度数据进行阿贝尔逆

变换, 离电弧中心越近的变换结果其误差越大, 这是阿贝尔逆变换本身的特点造成的。而在电弧的诊断中, 电弧中心的物理量总是比较重要的, 因而在阿贝尔逆变换前辐射强度分布中心的确定对于诊断结果的可信度具有很大的影响。

Kalal 等<sup>[3]</sup>采用辐射强度作为加权系数计算中心位置, Engel 等<sup>[9]</sup>则采用曲线两边等强度两数据点的中心位置作为对称轴。与以中心附近强度的一次微分为零的位置作为对称轴相比, 这些方法更加准确, 但是一些数据点的异常分布可能使中心的确定产生大的误差。

对图 1 中的数据进行滤波和插值后得到图 2 中虚线所示的分布。处理后的数据在中心附近的分布得到很好地恢复, 但由于噪声的影响, 恢复后的数据出现一定的不对称性。对以上数据进一步采用本文所述的方法对称化后得到图 2 中实线所示的分布。对数据左右取平均值和傅里叶变换对称化是同一种方法的两种不同表现形式, 它们分别从时域和频域对数据进行处理, 由于确定数据分布中心后在频域对数据处理比较方便, 因而选用傅里叶变换对称化。经过以上处理后, 数据中的噪声基本消除, 同时数据分辨力也得到提高。

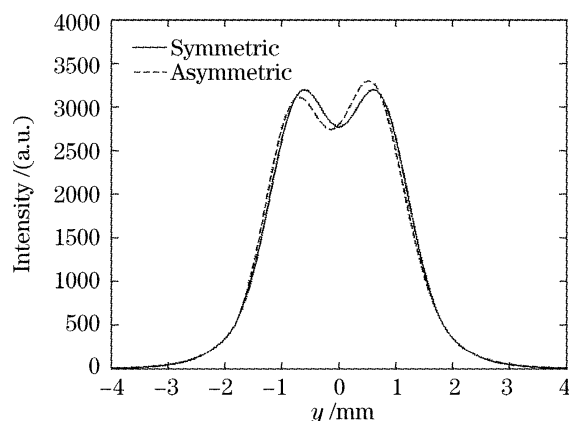


图 2 处理后的辐射强度分布

Fig. 2 Intensity profiles after processing

图 3 是对图 2 中的数据进行阿贝尔逆变换后的发射系数分布, 对称化和非对称化的数据得到的发射系数在外部比较接近, 但在中心附近则有较大的差别。电弧阴极下部温度一般超过 20000 K, 此温度附近对应的发射系数变化较慢, 计算温度时容易产生大的误差。在实际应用中, 不对称的数据可能使中心的发射系数出现负值, 使得诊断结果很不可靠, 甚至无法得到正确的结果。

图 4 是电弧不同截面的辐射强度分布。电弧从阴极区向阳极区逐渐扩展, 阴极区电弧横截面小, 扫

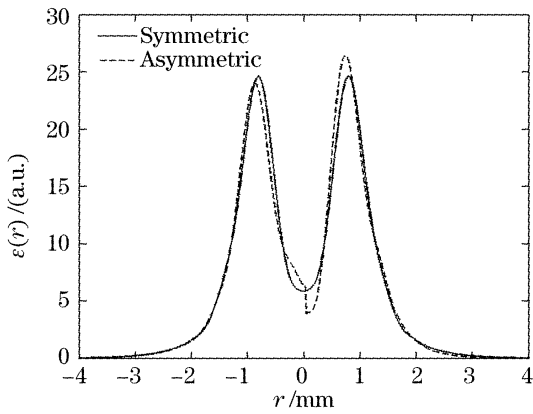


图 3 阴极下 0.5 mm 截面处发射系数分布

Fig. 3 Emission coefficient profiles, 0.5 mm from cathode 描的数据点数较少。通过补零后,所有截面扫描数据具有相同的点数,对其分别进行滤波、插值和对称化后得到如图 5 所示的分布。

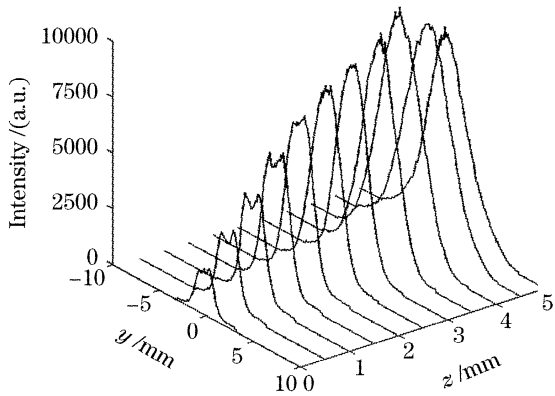


图 4 电弧各截面处辐射强度分布

Fig. 4 Intensity profiles for different cross-sections of an arc

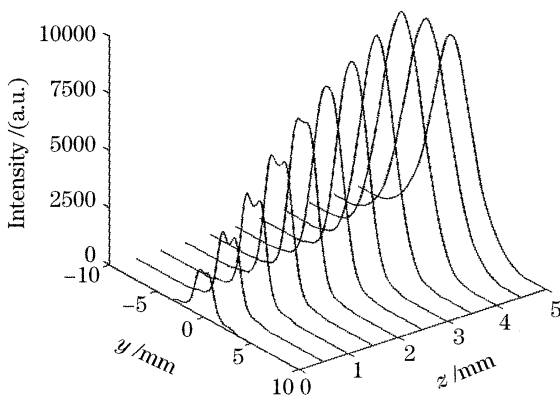


图 5 滤波、插值、对称化处理后辐射强度分布

Fig. 5 Intensity profiles after filtering, interpolation and symmetrization

图 6 为采用 256 点阿贝尔逆变换矩阵进行计算得到的电弧等离子体发射系数场。在电弧中辐射强度的最大值处在阳极附近中心位置,而发射系数的最大值并不在电弧的中心,其分布具有离轴最大特性,这些与实际是相符的。

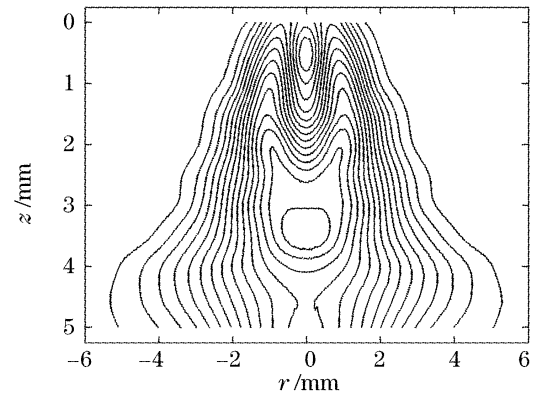


图 6 电弧发射系数场

Fig. 6 Emission coefficient contours of an arc

由于钨极几何形状、等离子体的热辐射和热传导、阴极的电导产生的热量、热电子和对流冷却作用等的相互影响,在阴极区接近钨极的薄层内,粒子密度和温度分布发生陡峭的转变,表现出不连续性,钨极附近的温度是非均匀分布的,钨极表面温度较低,阴极区出现最高温度<sup>[10]</sup>。图 7 是对求得的发射系数采用标准温度法计算得到的电弧温度场。在钨极下方约 0.5 mm 处温度最高,超过 22000 K,这与文献中许多作者的测量结果是一致的。

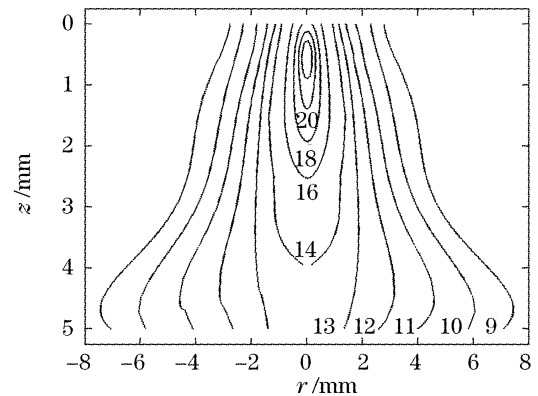


图 7 电弧等温线图,等温线中温度单位为 1000 K

Fig. 7 Temperature contours of an arc in unit of 1000 K

### 6 结 论

为了满足电弧等离子体诊断的需要,提出了一种恢复电弧等离子体发射系数的数据处理算法。采用计算简单、变换精度高的 Bockasten 三次多项式插值方法实现离散的阿贝尔逆变换。同时为了克服阿贝尔逆变换存在奇异点和微分项给变换带来的困难,在变换前对数据进行了滤波、插值、对称化处理,极大地降低了实验数据中噪声对计算结果的影响,显著地提高了计算结果的精度。

采用此算法对实验数据进行了处理,得到了

200 A电弧的发射系数场。通过求得的发射系数,采用标准温度法计算得到了电弧的温度分布,计算结果与其他作者测量的温度分布非常相近,在阴极下方 0.5 mm 处电弧温度最高,超过 22000 K。本文的算法数据处理速度快,能够用于电弧等离子体的实时检测和控制。

### 参 考 文 献

- 1 Yanbin Chen, Zhenglong Lei, Liqun Li *et al.*. Influence of shielding gas pressure on welding characteristics in CO<sub>2</sub> laser-MIG hybrid welding process[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(1): 33~35
- 2 K. Bockasten. Transformation of observed radiances into radial distribution of the emission plasma [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1961, **51**(9): 943~947
- 3 M. Kalal, K. A. Nugent. Abel inversion using fast Fourier transforms[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **27**(10): 1956~1959
- 4 L. M. Smith, D. R. Keefer, S. I. Sudharsanan. Abel inversion using transform techniques[J]. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 1998, **39**(5): 367~373
- 5 Jiang Shaoen, Liu Zhongli, Tang Daoyuan *et al.*. Inverted Abel transform based on FFT and Hankel transform[J]. *Acta Optica*

- Sinica*, 1999, **19**(5): 660~664 (in Chinese)  
江少恩,刘忠礼,唐道源等. 基于快速傅里叶变换和汉克耳变换的逆阿贝尔变换[J]. *光学学报*, 1999, **19**(5): 660~664
- 6 A. Savitzky, M. J. E. Golay. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures[J]. *Anal. Chem.*, 1964, **36**(8): 1627~1639
  - 7 J. I. Fernández Palop, J. Ballesteros, V. Colomer *et al.*. A new smoothing method for obtaining the electron energy distribution function in plasmas by the numerical differentiation of the I-V probe characteristic [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1995, **66**(9): 4625~4636
  - 8 Wan Xiong, He Xindao, Gao Yiqing. A novel limited-view tomography algorithm based on maximum entropy and its application[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(12): 1433~1438 (in Chinese)  
万 雄,何兴道,高益庆. 一种少投影光学层析新算法及其应用 [J]. *光学学报*, 2003, **23**(12): 1433~1438
  - 9 U. Engel, C. Prokisch, E. Voges *et al.*. Spatially resolved measurements and plasma tomography with respect to the rotational temperatures for a microwave plasma torch [J]. *J. Anal. At. Spectrom.*, 1998, **13**: 955~961
  - 10 F. Könnemann, G. Kühn, J. Reiche *et al.*. Near-cathode region of a free-burning arc: a spectroscopic investigation [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2004, **37**(2): 171~179

## 第十八届全国激光学术会议在哈尔滨召开

第十八届全国激光学术会议于 8 月 13~17 日在哈尔滨工业大学科学园国际会议中心顺利召开。大会名誉主席由周炳琨院士担任,会议主席为范滇元院士和周寿桓院士。本次会议由中国光学学会与中国电子学会联合主办,哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室,黑龙江省光学学会共同承办,上海光学精密机械研究所等 13 家单位协办。

本次会议邀请了徐至展、周寿桓等 11 位院士和专家作大会邀请报告。会议内容精彩纷呈,院士和专家们介绍了我国近年来激光领域的重大研究进展,为今后激光领域的发展指明了方向。其中徐至展院士分析了超强超短激光与强场超快科学中面临的重大问题,对国家科技进步一等奖“小型化 OPCPA 超短超强激光装置”在强场超快科学中的应用做了展望。祝世宁教授介绍了该小组在光学超晶格及其在激光技术应用中的研究进展,该研究也是国家自然科学基金一等奖“介电体超晶格材料的设计、制备、性能和应用”应用中非常重要的一方面。另外共有 300 多名来自高校、研究所以及公司激光领域的工作者参加了本次会议。按照研究方向大会共设四个分会场,分别是激光物理、非线性光学及量子光学;全固态激光器及新型激光器;激光应用,激光材料、薄膜及元器件;光束传输、控制及光束特性。大会共收到来自全国各地投稿 350 多篇,涉及科研院所、大专院校、高新企业 90 多家单位,其中国家实验室及国家重点实验室 17 个,部级重点实验室 11 个,会议共录用口头报告 249 篇,张贴报告 56 篇,到会代表 330 多人。除了学术报告之外,大会邀请了相干公司做了关于激光器及各种激光产品的介绍报告。最后大会还邀请与会人员参观了哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室。

全国激光学术会议自 1962 年开始举办,是国内光学界非常重要的学术会议,并以其很高的会议质量和论文水平,得到光学界专家学者的一致肯定。全国激光学术会议每两年召开一次,下次会议时间为 2009 年,地点为北京。

本次会议的优秀论文将由《中国激光》正式出版。